

黄土残塬区不同种植类型下耕地土壤肥力与经济效益耦合关系研究

王红阳¹, 陈伟^{1,2*}, 李亚新¹, 张驰¹

1. 山西师范大学 地理科学学院, 太原 030031

2. 山西省资源环境信息化管理院士工作站, 太原 030031

摘要: 塬地农田作为黄土高原地区发展种植业的最佳区域, 近年来由于人类对农业种植类型的不合理选择, 使得该区域土壤保肥持水的水平降低, 且已对作物生长及农业经济发展产生严重威胁, 故本文旨在研究该区域不同种植类型下耕地土壤肥力和经济效益耦合关系, 从而选取合适的种植类型。本研究选取晋西南塬地四种典型样地类型(玉米、棉花、马铃薯、荒地)为研究对象, 对2019年、2020年全生育期(3—10月)土壤肥力及产值产量进行测定, 基于实验数据采用耦合协调度模型综合分析各作物种植下肥力、经济效益状况及耦合协调度。结果表明:(1)不同种植类型下土壤肥力有显著差异, 其中马铃薯种植下土壤肥力最高;(2)不同生育期土壤肥力变化有异, 除土壤含水量外各肥力指标在快速发育期含量最高而生长中期显著降低, 土壤含水量在快速发育期含量最低;(3)各土壤肥力指标含量在20—40 cm土层较高, 土壤含水量在0—20 cm土层含量较低;(4)各种种植类型下经济效益排序为棉花>马铃薯>玉米>荒地, 其中棉花经济效益分别为马铃薯、玉米和荒地的1.17倍、1.36倍和3.40倍;(5)马铃薯种植下耦合协调度最高, 棉花和玉米次之, 荒地最低。综上, 马铃薯种植对肥力改善具有重要意义, 而以经济创收为目的的优势种植类型为棉花。农业的可持续发展要求经济创收和地力保护相协调, 本研究表明马铃薯为晋西南黄土残塬区兼顾经济增长和农业环境保护的最佳种植类型, 应积极推广种植。以上各作物类型种植下在快速发育期应及时灌溉以减小水分对肥力改善和作物产量的限制。该研究对黄土残塬区耕地种植类型的合理选择、科学施灌及促进农业可持续发展等具有重要意义。

关键词: 黄土残塬区; 不同种植类型; 土壤肥力; 经济效益

Study on the coupling relationship between soil fertility and economic benefits of cultivated land under different planting types in loess residual tableland

WANG Hongyang¹, CHEN Wei^{1,2*}, LI Yaxin¹, ZHANG Chi¹

收稿日期: 2022-02-12; 录用日期: 2022-04-18; 网络出版: 2022-05-04

Received Date: 2022-02-12; Accepted Date: 2022-04-18; Online first: 2022-05-04

基金项目: 山西师范大学研究生双语课程建设项目(YJSSY201904); 山西省回国留学人员科研资助项目(2020-092); 山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(2020020)

Foundation Item: Shanxi Normal University Graduate Bilingual Course Construction Project (YJSSY201904); Shanxi Scholarship Council of China (2020-092); The Program for the Scientific Activities of Selected Returned Overseas Professionals in Shanxi Province (2020020)

通信作者: 陈伟, E-mail: wan_xin_chen@126.com

Corresponding Author: CHEN Wei, E-mail: wan_xin_chen@126.com

引用格式: 王红阳, 陈伟, 李亚新, 等. 2022. 黄土残塬区不同种植类型下耕地土壤肥力与经济效益耦合关系研究[J]. 地球环境学报, 13(4): 465–476.

Citation: Wang H Y, Chen W, Li Y X, et al. 2022. Study on the coupling relationship between soil fertility and economic benefits of cultivated land under different planting types in loess residual tableland [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(4): 465–476.

1. School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China

2. Shanxi Provincial Resources and Environment Information Management Academician Workstation, Taiyuan 030031, China

Abstract: Background, aim, and scope Tableland farmland was one of the best area for the development of planting industry in the Loess Plateau. The soil fertility and water retention in the tableland farmland had been reduced and posed a serious threat to crop growth and agricultural economic development due to the unreasonable selection of agricultural planting types in recent years. Therefore, this paper aims to study the coupling relationship between soil fertility and economic benefits of cultivated land under different planting types in the region, so as to select appropriate planting types. **Materials and methods** Four typical lands (corn, cotton, potato, and abandon land) in southwest Shanxi were selected as the research objects, and the soil fertility, output value and yield during the whole growth period (March—October) in 2019 and 2020 were measured. The coupling coordination degree model was used to comprehensively analyzed the fertility, economic benefit and coupling coordination degree of each crop based on the experimental data. **Results** The results showed that: (1) there were significant differences in soil fertility under different planting types, among which the soil fertility under potato planting was the highest. (2) The changes of soil fertility in different growth stages were different. Except for soil water content, all of the fertility indexes were the highest in the rapid development period and significantly decreased in the middle growth period, and soil water content was the lowest in the rapid development period. (3) When compared among the soil layers, soil fertility indexes content was the highest in 20—40 cm soil layer, and soil water content was the lowest in 0—20 cm soil layer. (4) The order of economic benefits under different planting types was cotton > potato > corn > abandon land, in which the economic benefits of cotton were 1.17, 1.36, and 3.40 times that of potato, maize and abandon land, respectively. (5) The coupling coordination degree was the highest under potato planting, followed by cotton and maize, and the lowest in abandon land. **Discussion** (1) The soil water content and nutrient content were the highest under potato planting when compared with the other crops, because the soil rhizosphere with strong soil enzyme activity and high nitrogen fixation efficiency which could provide a good nutrients environment. In addition, potato stems and leaves growing close to the ground had a positive effect on reducing soil water content evaporation. The low content of corn land may be due to the high demand for nutrients by its own physiological structure and growth habits, and it was also due to the shallow planting and fertilization of corn in recent years and the large loss of surface water and nutrients due to evaporation, wind invasion and leaching. (2) Cotton planting had the highest economic benefits when compared with the other crops, mainly because of its high economic value and less substitutes. As China's largest food crop, corn planting has lower economic benefits mainly because of its lower economic value than other crops and weak processing, transformation and value-added ability. **Conclusions** Based on the above results, potato planting had best significance to improve of soil fertility, while the dominant planting type for the purpose of economic income generation was cotton. The sustainable development of agriculture required the coordination of economic growth and soil fertility protection. This study found that potato planting should be balance the economic growth and agricultural environmental protection in loess residual tableland in southwest Shanxi. **Recommendations and perspectives** In order to reduce the limitation of water on fertility improvement and crop yield, irrigation should be carried out in time during the rapid development period under every crop types. This study had important meaning to the reasonable selection of cultivated land planting types, scientific irrigation and the promotion of agricultural sustainable development in loess residual tableland.

Key words: the loess residual tableland; different planting types; soil fertility; economic benefit

塬地是黄土高原典型的旱作农业区,是区域粮食自给和安全保障的重要补充(张树兰等,2005)。近年来人们对塬地种植类型的不合理选择和施灌管理使土壤肥力变化规律被扰动,对作物产值产量及生态环境造成不利影响。科学地选取种植种类、合理施灌和平衡土壤肥力与经济效益间的关系是区域农业高质量发展的迫切需要(刘慧等,2021)。

作为作物生长的基础,土壤肥力水平因种植类型不同而有异。众多学者针对不同种植类型下土壤肥力特征进行研究,发现花生地养分含量高于玉米地(范玮玮等,2021),稻田土壤有机质(soil organic matter, SOM)等养分含量低于荒地(迟美静等,2018;杨彩迪等,2020);土壤养分随生育期变化明显,如花生种植前养分含量低于成熟期(索炎炎等,2021),玉米种植下拔节期养分含量较高,抽雄期土壤含水量(soil water content, SWC)对玉米生长影响较大(朱浩宇等,2020;戴嘉璐等,2021);不同土层养分含量亦有差异,在喀斯特地区坡耕地土壤养分呈表聚现象(范夫静等,2014),该地区灌丛草地养分含量随土层深度增加亦降低(陈莹等,2015)。研究表明作物产量因不同种植模式和培肥制度而异,如垄面覆秸秆较覆膜更利于马铃薯生长和品质提高(何进勤等,2017),麦后直播可使经济效益达到最佳(杨长琴等,2021),黑土区生物炭的施用量及频率对大豆产量影响较大(刘慧等,2021)。上述研究丰富了对各种种植类型下土壤肥力及产值产量状况的认识,但多以研究单种植类型为主。近年来晋西南黄土塬区农业规模化建设开展迅速,以玉米、马铃薯为主的粮食作物规模种植明显提高(山西省地图集编纂委员会办公室,2012),但种植选择不合理、土壤水肥不平衡和经济效益较低等问题仍是制约当地农业发展的主要因素(孙从建等,2019),故针对该研究区对比多种种植类型之间土壤肥力水平和经济效益且对其综合分析十分重要。

因此,本研究选取玉米、棉花、马铃薯和荒地四种典型种植类型,采用耦合协调度模型研究其对耕地土壤肥力及经济效益影响,旨在同时满足肥力和经济效益的情况下为塬地种植类型的合理选择、水肥科学管理及区域农业生态保护及高质量发展提供理论依据。

1 研究区概况

本研究以黄土高原典型残塬沟壑区冯家沟作为研究区域,该区位于山西省临汾市乡宁县昌宁镇($35^{\circ}57'N$, $110^{\circ}48'E$),塬面高阔残缺,沟壑纵横交错,地势西北高、东南低,海拔大部分在900—1500 m。气候类型属暖温带半干旱大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年均温为 $9.9^{\circ}C$,气温日较差和年较差较大,年平均降水量为631.8 mm,年内分布不均匀,无霜期平均150 d,年蒸发量为1749.4 mm(孙从建等,2019)。当地重点发展旱塬农业,种植作物主要有玉米(*Zea mays*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)等;天然植被广布,主要分布有油松(*Pinus tabulaeformis*)、榆树(*Ulmus pumila*)、蒿草(*Artemisia annua*)、芦草(*Agropyron mongolicum*)等;土壤以褐土为主,基本理化性质如下:SWC为17.12%,SOM含量为 $9.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮(total nitrogen, TN)、有效磷(available phosphorus, AP)和速效钾(available kalium, AK)含量分别为 $0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $11.90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $113.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH为7.52,土壤容重为 $1.43\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,孔隙度为47.47%(王佳等,2021)。

2 试验设计的方法

2.1 试验设计

试验于2019—2020年在冯家沟水土保持监测站(图1)进行,为期两年(表1)。试验设置玉米、棉花、马铃薯和荒地四种样地类型,各类型设3个重复(供试土壤一致)。在3月下旬撒施尿素作为基肥,4月中旬沟施复合肥料(K_2O , 20%; N, 13%; P_2O_5 , 10%)后双垄沟种植玉米、棉花、马铃薯于样地内且进行灌溉(荒地为自然状态,无干扰)。其中尿素用量为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (折合纯N $103.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),复合肥用量为 $525\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (折合 K_2O $105\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 纯N $68\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $53\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),灌溉用水为 $900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ (玉米)、 $225\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ (棉花)、 $120\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ (马铃薯)。根据研究区3种作物生长特点(表1),将样品采集时间划分为3月15日(背景期)、4月15日(初始生长期)、5月15日和6月15日(快速发育期)、7月15日和8月15日(生长中期)、9月15日(成熟期),分别在2019年、2020年按“S”形五点取样法(样地面积为 28 m^2)采集土壤

样品（因 5 月 15 日和 6 月 15 日均属快速发育期，7 月 15 日和 8 月 15 日均属生长中期，需分别将同生育期所采样品充分混合），使用土钻垂直分层取

20 cm、40 cm、60 cm、80 cm 深度土壤，将同样地同深度样品等量充分混合。最后，测定 SWC、SOM、TN、AP、AK 及产值产量。

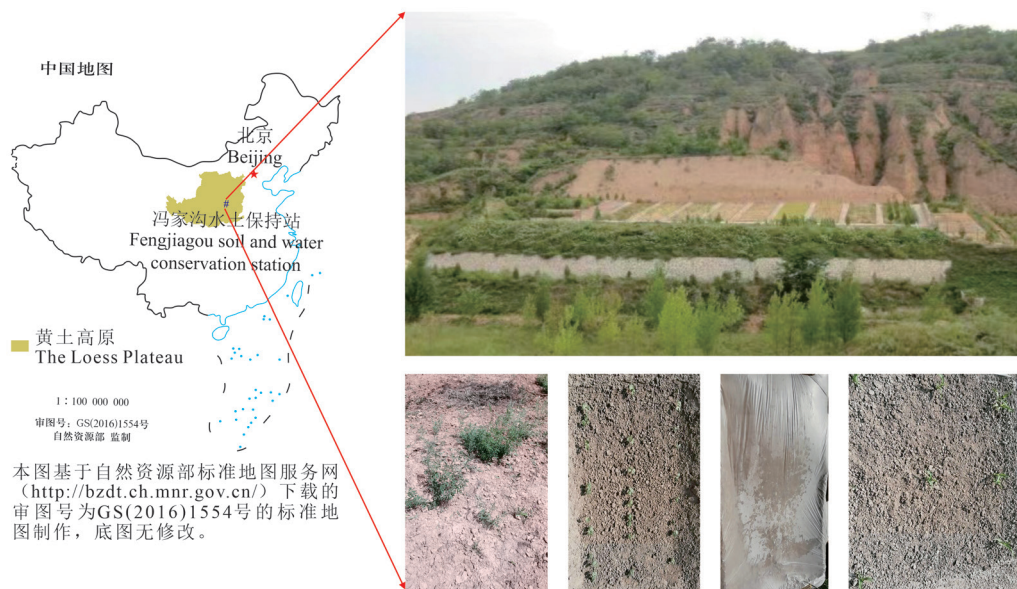


图 1 试验地概况
Fig. 1 Survey experimental site

表 1 试验样地及土壤样品采集信息 Tab. 1 The information of experimental field and soil sampling					
种植类型 Planting types	种子品种 Seeds	种植密度/(株·hm ⁻²) Plant density/(plants·hm ⁻²)	种植制度 Plant system	生育期 Growth periods	样本量 Sample
玉米 Corn	良玉 99 Liangyu 99	6.75 × 10 ⁴	连作 (一年一季) Continuous cropping (planted once a year)	出苗(4月)→拔节(6月)→抽穗(7月)→灌浆(8月)→成熟(9月) Seedling emergence (Apr.)→jointing (Jun.)→heading (Jul.)→filling (Aug.)→maturing (Sep.)	840
棉花 Cotton	大禹 21 Dayu 21	6.00 × 10 ⁴		出苗(4月)→开蕾(6月)→花铃(7—8月)→吐絮(9月) Seedling emergence (Apr.)→budding (Jun.)→boll (Jul.—Aug.)→boll opening (Sep.)	840
马铃薯 Potato	中薯 3 号 Zhongshu 3	7.50 × 10 ⁴		幼苗(4—5月)→块茎发育(6月)→淀粉积累(7月)→成熟(9月) Seedlings (Apr.—May)→tuber development (Jun.)→starch accumulation (Jul.)→maturation (Sep.)	840
荒地 Abandon	/	/	/	/	840

2.2 测定方法

2.2.1 土壤肥力

SWC测定用 110℃烘干法（Liu et al, 2021）；SOM 用重铬酸钾加热 - 硫酸亚铁滴定法；TN 用凯氏定氮法；AP 用碳酸氢钠浸提 - 钼锑抗比色法（张勇强等，2020）；AK 用乙酸铵浸提 - 火焰

光度计法。基于实验测定各作物类型、生育期、土层深度土壤水分、养分数据，运用 SPSS 22.0 和 Canoco for Windows 4.5 分别进行单因素 ANOVA 方差分析和 PCA 分析并用 Origin 2017 作图。所有室内分析测试在山西省水土保持科学研究所进行。

2.2.2 经济效益指标

投入=农资费用(种子、肥料、农药)+生产服务(浇灌、机械、租用),其中各类型要素价格以本试验实际价格为标准,其中种子43元·kg⁻¹(玉米)、40元·kg⁻¹(棉花)、3元·kg⁻¹(马铃薯),尿素2.5元·kg⁻¹,复合肥3元·kg⁻¹,农药50元·L⁻¹,灌溉费用450元·hm⁻²(玉米)、112.5元·hm⁻²(棉花)、60元·hm⁻²(马铃薯),机械150元·d⁻¹,人工100元·d⁻¹,地租1500元·hm⁻²。产值=单价×产量,利润=产值-投入(李嘉等,2020;米晓田等,2021),产量由本试验实测获得并采用小区计产法计算(陈世超等,2020),作物单价参照《全国农产品成本收益资料汇编2011》(国家发展与改革委员会价格司,2011),其中玉米单价为2200元·t⁻¹、棉花9200元·t⁻¹、马铃薯1400元·t⁻¹。

2.3 耦合协调度

2.3.1 肥力效益和经济效益

综合分析作物的种植效益具有复杂性,本研究立足试验并参照前人研究构建效益及指标体系,将效益分为肥力和经济两个类别。设各有 x 个肥力和经济效益指标, z_{ij} 为 j 作物的第 i 个指标标准化数值,指标权重由熵值法计算(刘慧等,2021)。

信息熵 A_i 为:

$$A_i = -\frac{1}{\ln n} \times \sum_{j=1}^n (z_{ij} \times \ln z_{ij}) \quad (1)$$

信息熵冗余度 B_i 为:

$$B_i = 1 - A_i \quad (2)$$

指标权重 C_i 为:

$$C_i = B_i \div \sum_{i=1}^x B_i \quad (3)$$

肥力效益 R_j 和经济效益 S_j 为:

$$R_j, S_j = \sum_{i=1}^x (C_i \times z_{ij}) \quad (4)$$

2.3.2 耦合协调度模型

耦合协调度模型定量分析该研究中土壤肥力和经济效益耦合度和协调度,其中:

耦合度 D_j 为:

$$D_j = [R_j \times S_j \div (R_j + S_j)^k]^{\frac{1}{k}} \quad (5)$$

综合协调指数 E_j 为:

$$E_j = \alpha \times R_j + \beta \times S_j \quad (6)$$

协调度 F_j 为:

$$F_j = \sqrt{D_j \times E_j} \quad (7)$$

式中: k 为调节系数,本研究有肥力和经济两种效益类别,故 k 为2; α 和 β 为待定系数,各取值0.5。

耦合度和协调度分级如表2所示(王继军等,2010)。

表2 耦合度和协调度等级划分
Tab. 2 Coupling degree and coordination degree classification

耦合度 Coupling degree	耦合水平 Coupling level	协调度 Coordination degree	协调水平 Coordination level
$0 < B \leq 0.3$	低水平耦合	$0 < D \leq 0.2$	重度失调 Severe disorders
	Low-level coupling	$0.2 < D \leq 0.3$	中等失调 Moderate disorders
$0.3 < B \leq 0.5$	拮抗耦合	$0.3 < D \leq 0.4$	轻度失调 Mild disorders
	Antagonistic coupling	$0.4 < D \leq 0.5$	濒临失调 Endangered disorders
$0.5 < B \leq 0.8$	适应耦合	$0.5 < D \leq 0.6$	勉强协调 Reluctant coordination
	Adaptive coupling	$0.6 < D \leq 0.7$	初级协调 Primary coordination
$0.8 < B \leq 1.0$	高水平耦合	$0.7 < D \leq 0.8$	中级协调 Intermediate coordination
		$0.8 < D \leq 0.9$	良好协调 Good coordination
		$0.9 < D \leq 1.0$	优质协调 High-quality coordination

3 结果与分析

3.1 不同种植类型下的土壤肥力效益

3.1.1 不同种植类型对整体土壤肥力的影响

土壤肥力因种植类型不同而差异显著(图2)。其中马铃薯种植下土壤肥力最高,SWC、SOM、TN、AP和AK含量较荒地分别高5.98%、

19.60%、37.50%、18.97%、37.09%;棉花种植下土壤肥力低于马铃薯但高于玉米和荒地,上述各肥力指标较荒地分别提高了2.68%、13.20%、31.25%、16.05%、31.20%;玉米种植下土壤肥力较低,分别为16.82%、10.69 g·kg⁻¹、0.37 g·kg⁻¹、12.91 mg·kg⁻¹、127.49 mg·kg⁻¹;荒地土壤肥力最

低。单因素方差分析显示：马铃薯种植下 SWC、SOM 和 AK 含量与其他作物差异显著，马铃薯和棉花种植下 TN、AP 含量与玉米和荒地有显著差异，荒地土壤肥力与作物种植下均有显著差异性。

3.1.2 不同种植类型对各生育期土壤肥力的影响

不同种植类型下各生育期土壤肥力均有显著变化，但种植类型的不同使各生育期变化幅度有差异。由图 3 可知，各种种植类型下 SWC 从背景期至快速发育期均降低，其中荒地 SWC 最低，从快速发育期至生长中期均升高，其中玉米种植下变化最显著，从生长中期至成熟期玉米地和荒地 SWC 降低，而棉花和马铃薯地升高；除荒地外其他种植类型下 SOM、TN 从背景期至快速发育期均升高，从快速发育期至生长中期均降低，而荒地 TN 从背景期至生长中期均降低，SOM 从生长中期至成熟期均有不同程度升高，荒地全生育期 SOM、TN 均低于其他种植类型；除荒地外其他种植类型下 AP、AK 从背景期至初始生长期降低，从初始生长期至快速发育期升高，从快速发育期至生长中期亦降低，而荒地 AP、AK 含量均降低，除马铃薯外其他各种种植类型下 AP、AK 从生长中期至成熟期均有不同程度的升高而马铃薯种植下 AK 降低，各种种植类型下全生育期荒地 AP、AK 均最低且变化最小，而马铃薯种植下变化幅度较大。

单因素方差分析显示（表 3）：玉米、棉花、马铃薯和荒地土壤肥力在快速生育期与背景期、初始生长期、生长中期和成熟期有显著差异性，而 SWC 在生长中期与背景期、初始生长期、快速发育期和成熟期亦有显著差异，各生育期马铃薯、荒地分别与玉米、棉花种植下土壤肥力有显著性差异。

3.1.3 不同种植类型对各土层土壤肥力的影响

各种种植类型下不同土层土壤肥力差异显著，且各土层土壤肥力因种植类型不同亦有差异（图 4）。除马铃薯外其他种植类型下 SWC、SOM、TN、AP 和 AK 在 20—40 cm 均高于其他土层，而马铃薯种植下 SOM 在 0—20 cm 最高，为 $12.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。除马铃薯外其他种植类型下 SWC、SOM 在 0—20 cm 均低于其他土层，而马铃薯种植下 SOM 在 40—60 cm 最低，为 $11.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。各种种植类型下 TN、AP 均在 60—80 cm 最低，而 AK 在各土层的分布因种植类型不同差异显著，其中马铃薯和荒地 AK 在 60—80 cm 最低，棉花种

植下 AK 在 40—60 cm 低于其他土层，而玉米种植下在 0—20 cm 最低。单因素方差分析显示：各种种植类型下土壤肥力在 20—40 cm 处与其他土层有显著性差异，而土壤水分在 0—20 cm 处与其他土层有显著性差异，各土层马铃薯和荒地土壤肥力分别较其他种植类型有显著性差异。

3.2 不同种植类型下的经济效益分析

不同种植类型下经济效益存在一定差异（表 4）。种植马铃薯每公顷总投入为 1.39 万元，棉花、玉米投入次之，分别为 1.25 万元、0.65 万元，荒地无投入；种植棉花每公顷总产值为 4.14 万元，马铃薯、玉米次之，分别为 3.68 万元、2.48 万元，荒地无产值；种植棉花每公顷年均利润为 2.89 万元，在各种种植类型中经济效益最高，其次为马铃薯，年均利润为 2.29 万元，种植玉米年均利润仅为 1.83 万元，荒地无利润，种植棉花每公顷年均利润分别比马铃薯、玉米和荒地高 0.60 万元、1.06 万元和 2.89 万元。

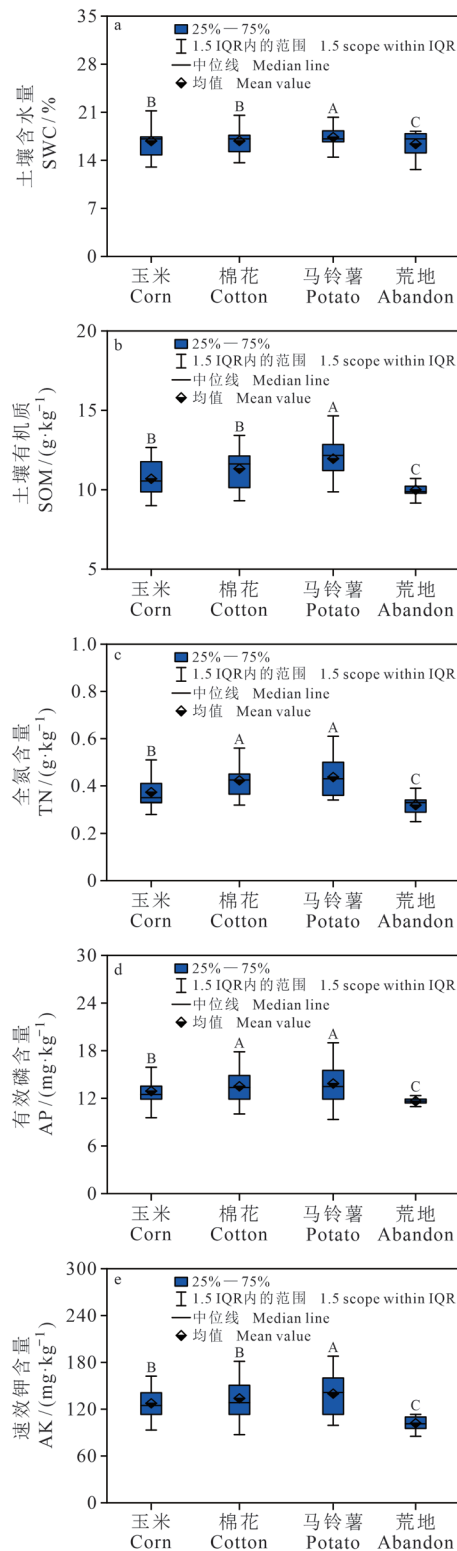
3.3 不同种植类型下的土壤肥力与经济效益耦合协调度

3.3.1 各效益指标和权重

肥力与经济效益各指标及其权重计算结果显示（表 5）：肥力效益指标中 AK 权重最大，为 0.23，AP、TN 次之，分别为 0.21、0.20，SWC 和 SOM 权重较小，均为 0.18，肥力效益指标属性均为正向指标；经济效益指标中产值权重最大，为 0.24，利润和投入权重次之，分别为 0.22 和 0.20，产量和单价权重较小，均为 0.17，经济效益指标中投入为负向指标。

3.3.2 肥力与经济效益耦合协调度

各效益指数及耦合协调度因种植类型不同而有差异（表 6），马铃薯种植肥力效益指数最高，为 1，棉花和玉米次之，分别为 0.78、0.48，荒地最低；经济效益排序为棉花 > 马铃薯 > 玉米 > 荒地，指数分别为 0.68、0.58、0.50 和 0.20；耦合度计算结果显示：玉米和棉花种植耦合度最高，均为 0.50，马铃薯次之，为 0.48，以上 3 种种植类型耦合水平均为拮抗耦合，荒地耦合度为 0；马铃薯种植协调度最高，为 0.62，棉花次之，为 0.60，以上两种种植类型协调度均属初级协调水平，玉米协调度为 0.49，属濒临失调水平，而荒地协调度亦为 0。

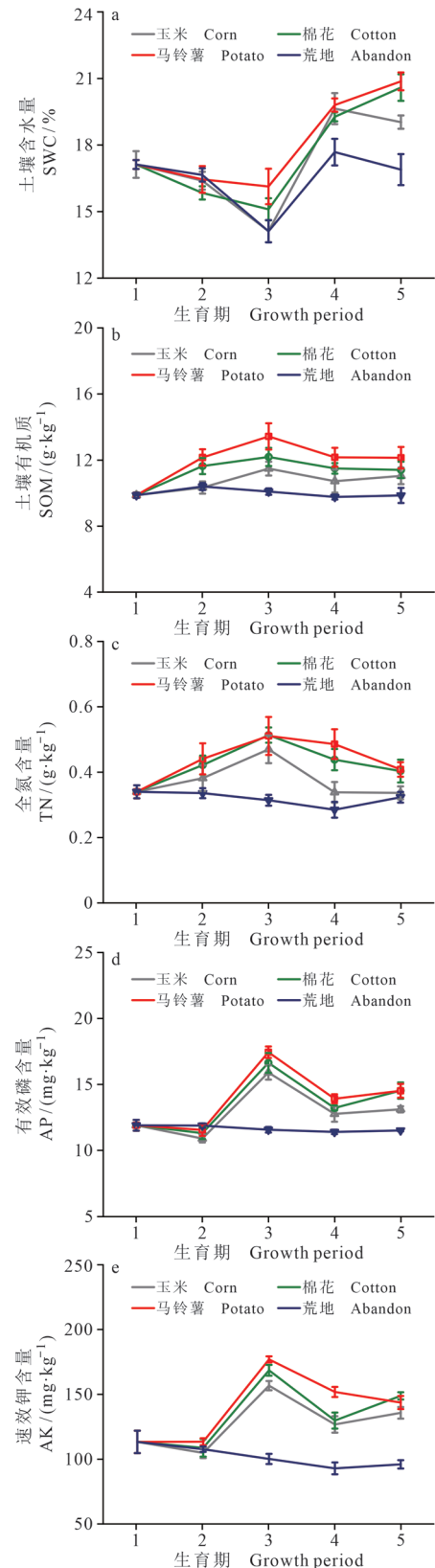


A、B 和 C 表示不同种植类型之间土壤肥力在 $\alpha < 0.05$ 水平上差异显著。

A, B and C showed significant differences of soil fertility at $\alpha < 0.05$ level among different planting types.

图2 不同种植类型下土壤肥力整体特征

Fig. 2 Entirety characteristics of soil fertility under different planting types



1: 背景期; 2: 初始生长期; 3: 快速发育期; 4: 生长中期; 5: 成熟期。1: background; 2: initial; 3: rapid; 4: middle; 5: maturing.

图3 不同生育期土壤肥力变化特征

Fig. 3 Variations characteristics of soil fertility under different growth periods

表 3 不同生育期土壤肥力差异性
Tab. 3 Soil fertility differences under different growth periods

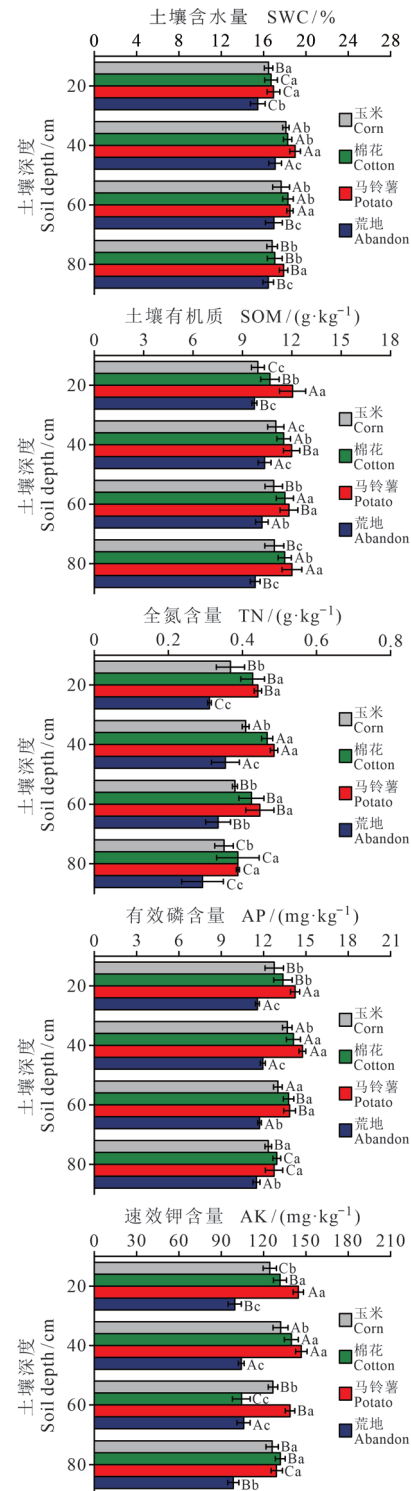
种植类型 Planting types	指标类型 Indexes	背景期 Background	初始生长期 Initial	快速发育期 Rapid	生长期 Middle	成熟期 Maturing
玉米 Corn	SWC	Ba	Ba	Cc	Ab	Ab
	SOM	Ca	Bc	Ab	Bb	Ab
	TN	Ca	Bb	Ab	Cb	Cb
	AK	Ca	Cc	Ab	Bb	Bb
棉花 Cotton	SWC	Ba	Cb	Cb	Ab	Aa
	SOM	Ca	Ab	Ab	Bb	Bb
	TN	Ca	Ba	Aa	Ba	Ba
	AK	Ca	Cb	Aa	Bb	Ba
马铃薯 Potato	SWC	Ba	Ba	Ba	Aa	Aa
	SOM	Ca	Ba	Aa	Ba	Ba
	TN	Ca	Ba	Aa	Aa	Ba
	AK	Ca	Ca	Aa	Ba	Ba
荒地 Abandon	SWC	Aa	Aa	Bc	Ac	Ac
	SOM	Ba	Ac	Ac	Bc	Bc
	TN	Aa	Ac	Ac	Bc	Ab
	AK	Aa	Bb	Bc	Bc	Bc

A、B 和 C 表示同一种植类型不同生育期之间土壤肥力在 $\alpha < 0.05$ 水平上差异显著；a、b 和 c 表示相同生育期不同种植类型之间土壤肥力在 $\alpha < 0.05$ 水平上差异显著。

A, B and C showed significant differences of soil fertility at $\alpha < 0.05$ level among different growth periods; a, b and c showed significant differences of soil fertility at $\alpha < 0.05$ level among different planting types.

4 讨论

土壤肥力效益因种植类型不同而有异。本研究发现马铃薯种植下土壤水分、养分含量较高，这是因为马铃薯种植下土壤酶活性较强且富含高效固氮的根瘤菌，植株及残体在土壤酶作用下缓慢矿化，不断向土壤提供养分具有肥田作用（夏皖豫等，2021），另外马铃薯地上植株较低且密度大对减少 SWC 蒸发耗损有积极作用（金万辉，2021）。AP、AK 含量在马铃薯种植下随生育期的变化幅度较大，是因为马铃薯属高淀粉块茎作物，在初始生长期利于其幼苗生长及光合效率提高的磷、钾肥吸收利用较多（何进勤等，2017），也可能因为有效态磷转化为无效态磷且被土壤固定（张勇强等，2020），而在生长中期由于其根瘤菌及土壤酶的作用对养分消耗较少。



A、B 和 C 表示同一种植类型不同土层之间土壤肥力在 $\alpha < 0.05$ 水平上差异显著；a、b 和 c 表示相同土层不同种植类型之间土壤肥力在 $\alpha < 0.05$ 水平上差异显著。

A, B and C showed significant differences of soil fertility at $\alpha < 0.05$ level among different soil vertical profile; a, b and c showed significant differences of soil fertility at $\alpha < 0.05$ level among different planting types.

图 4 不同土层土壤肥力分布特征
Fig. 4 Distribution characteristics of soil fertility under different soil layers

表 4 不同种植类型下投入—产出情况表										
Tab. 4 The information of input—output under different planting types										
种植类型 Planting types	投入 Input						产出 Output			利润 Profit /(10 ⁴ yuan·hm ⁻²)
	种子 Seed	肥料 Fertilizer	农药 Pesticide	浇灌 Irrigate	机械 Mechanical	租用 Rent	产量 Yield /(t·hm ⁻²)	单价 /(万元·hm ⁻²) Price /(10 ⁴ yuan·hm ⁻²)	产值 /(万元·hm ⁻²) Value /(10 ⁴ yuan·hm ⁻²)	
玉米 Corn	0.10	0.21	0.0075	0.045	0.06	0.23	11.25	0.22	2.48	1.83
棉花 Cotton	0.18	0.21	0.0075	0.011	0.21	0.63	4.50	0.92	4.14	2.89
马铃薯 Potato	0.68	0.21	0.0075	0.006	0.14	0.35	26.25	0.14	3.68	2.29
荒地 Abandon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
投入中各类型要素单位均为 10 ⁴ 元·hm ⁻² , 租用包含劳动力和土地。										
All types of input units are 10 ⁴ yuan·hm ⁻² , rent includes labor and land.										

表 5 效益指标和权重						
Tab. 5 Benefits indexes and weights						
效益类型	Benefit	效益指标	Benefit index	属性	Attribute	权重 Weight
肥力效益 Fertility benefit		土壤含水量	SWC		+	0.18
		土壤有机质	SOM		+	0.18
		速效钾	AK		+	0.23
		有效磷	AP		+	0.21
		总氮	TN		+	0.20
经济效益 Economic benefit		投入	Input		－	0.20
		产量	Yield		+	0.17
		单价	Price		+	0.17
		产值	Value		+	0.24
		利润	Profit		+	0.22
+ 表示对效益有正向作用的指标，－ 表示对效益有负向作用的指标。						
+ indicates positive effects on benefits and － indicates negative effects on benefits.						

表 6 不同种植类型下肥力与经济效益耦合协调度				
Tab. 6 Coupling coordination degree of fertility and economic benefits under different planting types				
种植类型 Planting types	肥力指数 Fertility index	经济指数 Economic index	耦合度 Coupling degree	协调度 Coordination degree
玉米 Corn	0.48	0.50	0.50	0.49
棉花 Cotton	0.78	0.68	0.50	0.60
马铃薯 Potato	1.00	0.58	0.48	0.62
荒地 Abandon	0	0.20	0	0

玉米种植相比马铃薯种植土壤 AK、AP 变化小且含量较低,可能是自身生理结构和生长习性对养分的需求多(戴嘉璐等, 2021);又可能因为近年来玉米种植及施肥均较浅且玉米地表层水分、养分由于蒸发、风侵及淋失等因素耗损较大(杨露等, 2020),导致玉米地土壤水分、养分减少。本研究还发现玉米地 SWC 从背景期至快速发育期降低幅度最大,这是因为春旱对土壤水分

有较大影响,且出苗后至抽雄期是玉米对水分、养分需求最多、对干旱反应最敏感的时期(朱浩宇等, 2020)。棉花种植与玉米相似,相比于吐絮期、出苗期和开蕾期,快速发育期气温升高、土壤微生物活动及棉花生长旺盛,叶面蒸腾和根系吸收水分达到高峰(王斌等, 2019),因此快速发育期是灌溉的关键时期。

各种植类型其经济效益亦有差异。本研究发

现：相较于其他作物，种植棉花经济效益最高，这主要是因为棉花自身经济价值高、替代品较少，也因其作为重要的工业原料和战略物资使附加值较粮食作物更高（樊海潮等，2021），故单价相对较高。马铃薯经济效益仅次于棉花，高于玉米和荒地，是因为马铃薯现已成为我国重要的粮食、蔬菜、饲料等兼用作物，其经济价值和市场占有率日益提升（罗磊等，2021），并且随着高产、高质量马铃薯品种的推广，目前马铃薯的抗病性、淀粉含量、果实大小及产量等指标均有较大提升（陈怡平等，2021），故其产值和利润得到提高。作为中国第一大粮食作物，玉米种植经济效益较低主要是因为其经济价值低于其他作物，加工转化增值能力较弱，又因为国内市场供需处于宽松状态，临储玉米收购政策的取消和市场定价机制的建立，使得由政策主导向供需主导转移，从而导致玉米价格大幅跌落（宫斌斌等，2021），使其单价、产值和利润远低于棉花和马铃薯。

肥力效益、经济效益的耦合协调度亦因种植类型不同而存在差异。相较于玉米、棉花和荒地，耦合协调度在马铃薯种植下最高，是因为马铃薯种植下土壤肥力效益较高，经济效益低于棉花但高于玉米、荒地。棉花种植下耦合协调度次之，是因为经济效益最高，但肥力效益与马铃薯相比较低。玉米种植下肥力效益、经济效益及耦合协调度指数低于马铃薯、棉花。相比于作物种植，荒地肥力效益、经济效益及耦合协调度指数均最低。综上所述，马铃薯的种植较其他类型更益于土壤生态的改善和地力条件的恢复。棉花种植经济效益最高，对当地脱贫攻坚、农民增收等具有十分重要的意义，但对土壤肥力的积累和改善与马铃薯相比水平较低且棉花种植对气候、地力、人为条件的要求较高（袁钧等，2002）。农业资源的合理开发利用要求经济发展与生态保护相协调，本文运用基于熵值法的耦合协调度模型旨在选择适宜于经济创收和生态保护协调发展的最佳种植类型。结果表明：该区域种植马铃薯在促进农业高质量、可持续发展方面效果最为可观，故应在当地积极推广马铃薯种植。

5 结论

（1）马铃薯种植下土壤肥力最高，棉花、玉

米次之，荒地最低，马铃薯样地和荒地土壤肥力分别与其他种植类型有显著性差异。快速发育期 SOM、TN、AP 和 AK 含量最高而在生长中期降低显著，SWC 在快速发育期含量最低。在 20—40 cm 土壤肥力较高，SWC 在 0—20 cm 较低，而其他养分含量因种植类型不同差异显著；（2）棉花种植下产值和利润均最高，马铃薯次之但投入最高，玉米种植下投入、产值及利润均低于棉花和马铃薯但高于荒地，故种植棉花经济效益最高，马铃薯和玉米次之，荒地最低；（3）四种样地类型中，马铃薯种植下耦合协调度最高，其次为棉花和玉米，荒地最低。

参考文献

- 陈世超, 杜太生, 王素芬, 等. 2020. 基于农田管理分区的制种玉米产量估算与限制因子评价 [J]. *农业工程学报*, 36(15): 128–133. [Chen S C, Du T S, Wang S F, et al. 2020. Evaluation of limiting factors and prediction of seed maize yield based on management zones [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(15): 128–133.]
- 陈怡平, 苏翠翠, 王祥龙, 等. 2021. 延安新造贫瘠耕地适生农作物及其高产品种筛选 [J]. *地球环境学报*, 12(2): 202–213. [Chen Y P, Su C C, Wang X L, et al. 2021. Selection of suitable crops and its best cultivar in newly created farmland of Yan'an region [J]. *Journal of Earth Environment*, 12(2): 202–213.]
- 陈莹, 李龙兴, 杨春燕, 等. 2015. 不同类型灌丛草地土壤养分的比较 [J]. *贵州农业科学*, 43(10): 139–143. [Chen Y, Li L X, Yang C Y, et al. 2015. Soil nutrients of different types of shrub grassland [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 43(10): 139–143.]
- 迟美静, 侯玮, 孙莹, 等. 2018. 东北黑土区荒地开垦种稻后土壤养分及 pH 值的变化特征 [J]. *土壤通报*, 49(3): 546–551. [Chi M J, Hou W, Sun Y, et al. 2018. Characteristics of soil nutrients and pH value of paddy fields with different planted years in black soil region of northeast China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 49(3): 546–551.]
- 戴嘉璐, 李瑞平, 李聪聪, 等. 2021. 河套灌区节水减肥对玉米不同生育期水分和养分的影响 [J]. *水土保持学报*, 35(1): 271–277. [Dai J L, Li R P, Li C C, et al. 2021. Effects of water saving and fertilizer reducing on water and nutrients of maize at different growth stages

- in the Hetao irrigated area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 35(1): 271–277.]
- 樊海潮, 赵中亭, 周亭英, 等. 2021. 鲁西南地区氮肥减施对蒜套棉产量品质以及效益的影响 [J]. *棉花科学*, 43(4): 46–50, 57. [Fan H C, Zhao Z T, Zhou T Y, et al. 2021. The effects of reduced nitrogen fertilizer application on yield and quality and benefits of garlic interplanting with cotton in southwestern Shandong [J]. *Cotton Sciences*, 43(4): 46–50, 57.]
- 范夫静, 宋同清, 黄国勤, 等. 2014. 西南峡谷型喀斯特坡地土壤养分的空间变异特征 [J]. *应用生态学报*, 25(1): 92–98. [Fan F J, Song T Q, Huang G Q, et al. 2014. Characteristics of spatial variation of soil nutrients in sloping field in a gorge Karst region, southwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(1): 92–98.]
- 范玮玮, 信秀丽, 钟新月, 等. 2021. 玉米豆科覆盖作物间作对潮土酶活性和真菌群落特征的影响 [J]. *土壤*, 53(6): 1236–1243. [Fan Y W, Xin X L, Zhong X Y, et al. 2021. Effects of intercropping of maize and legume cover crops on enzyme activities and fungal community characteristics in fluvo-aquic soil [J]. *Soils*, 53(6): 1236–1243.]
- 宫斌斌, 杨宁, 刘帅. 2021. 玉米生产者补贴政策实施效果及其完善 [J]. *农业经济问题*, 42(10): 127–138. [Gong B B, Yang N, Liu S. 2021. Implementation effect and improvement of corn producer subsidy policy [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 42(10): 127–138.]
- 国家发展与改革委员会价格司. 2011. 全国农产品成本收益资料汇编 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社: 186–189. [Price Department of National Development and Reform Commission. 2011. National agricultural cost-benefit data compilation: 2011 [M]. Beijing: China Statistical Press: 186–189.]
- 何进勤, 雷金银, 冒辛平, 等. 2017. 马铃薯覆膜方式对土壤氮磷钾养分与产量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, (2): 35–41. [He J Q, Lei J Y, Mao X P, et al. 2017. Effects of different film-mulching methods on soil nitrogen, phosphorus, potassium nutrients content and the potato yield in dry land [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, (2): 35–41.]
- 金万辉. 2021. 天祝县坡改梯土壤肥力提升措施和成效分析 [J]. *中国水土保持*, (4): 44–46. [Jin W H. 2021. Analysis on measures and effect of soil fertility improvement from slope to terrace in Tianzhu County [J]. *Soil and Water Conservation in China*, (4): 44–46.]
- 李嘉, 吕慎强, 杨泽宇, 等. 2020. 氮肥运筹对黄土塬区春玉米产量、效益和氮肥利用率的综合效应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 26(1): 32–41. [Li J, Lü S Q, Yang Z Y, et al. 2020. Comprehensive effects of nitrogen fertilizer management on yield, economic performance and nitrogen use efficiency of spring maize in Loess Plateau, China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 26(1): 32–41.]
- 刘慧, 温小艳, 李禹韬, 等. 2021. 生物炭施用模式生态效益与经济效益耦合协调度研究 [J]. *农业机械学报*, 52(11): 287–296. [Liu H, Wen X Y, Li Y T, et al. 2021. Coupling coordination degree of ecological benefits and economic benefits of biochar application models [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 52(11): 287–296.]
- 罗磊, 李亚杰, 姚彦红, 等. 2021. 不同小整薯规格和药剂拌种处理对旱作重茬马铃薯生长及产量的影响 [J]. *作物杂志*, (6): 211–216. [Luo L, Li Y J, Yao Y H, et al. 2021. Effects of planting small whole potatoes with different specifications and seed dressing on the growth and yield of potatoes in continuous cropping land [J]. *Crops*, (6): 211–216.]
- 米晓田, 石磊, 何刚, 等. 2021. 陕西省小农户作物生产的减肥潜力及经济效益评价 [J]. *中国农业科学*, 54(20): 4370–4384. [Mi X T, Shi L, He G, et al. 2021. Fertilizer reduction potential and economic benefits of crop production for smallholder farmers in Shaanxi Province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 54(20): 4370–4384.]
- 山西省地图集编纂委员会办公室. 2012. 山西省农业地图集 [M]. 西安: 西安地图出版社: 76–81. [Office of Shanxi Map Compilation Committee. 2012. Shanxi Agricultural Atlas [M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House: 76–81.]
- 孙从建, 侯慧新, 陈伟, 等. 2019. 典型黄土塬区不同植物措施水土保持效应分析 [J]. *自然资源学报*, 34(7): 1405–1416. [Sun C J, Hou H X, Chen W, et al. 2019. Effects of different plant measures on soil and water conservation in typical tableland zones on the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 34(7): 1405–1416.]
- 索炎炎, 张翔, 司贤宗, 等. 2021. 砂姜黑土区花生田种植前后土壤肥力空间变异特征分析及评价 [J]. *核农学报*, 35(4): 933–941. [Suo Y Y, Zhang X, Si X Z, et al. 2021. Spatial variation analysis and comprehensive evaluation of soil fertility for peanut in lime concretion black soil

- area [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 35(4): 933–941.]
- 王 斌, 万艳芳, 王金鑫, 等. 2019. 全生物降解膜对南疆棉花产量及土壤理化性质的影响 [J]. *中国棉花*, 46(10): 9–13. [Wang B, Wan Y F, Wang J X, et al. 2019. Effects of biodegradable mulch film on cotton yield and soil physical and chemical properties in southern Xinjiang, China [J]. *China Cotton*, 46(10): 9–13.]
- 王继军, 李 慧, 苏 鑫, 等. 2010. 基于农户层次的陕北黄土丘陵区农业生态经济系统耦合关系研究 [J]. *自然资源学报*, 25(11): 1887–1896. [Wang J J, Li H, Su X, et al. 2010. Study on coupling relationship of agricultural eco-economic system based on farm level in northern Shaanxi loess hilly-gully region [J]. *Journal of Natural Resources*, 25(11): 1887–1896.]
- 王 佳, 陈 伟, 张 强, 等. 2021. 黄土丘陵沟壑区低氮胁迫对苦荞生长及土壤养分的影响 [J]. *西南农业学报*, 34(11): 2412–2421. [Wang J, Chen W, Zhang Q, et al. 2021. Effects of low nitrogen stress on Tartary buckwheat growth and soil nutrients in loess hilly and gully region [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 34(11): 2412–2421.]
- 夏皖豫, 陈彦云, 柴忠良, 等. 2021. 宁南山区膜下滴灌对马铃薯土壤酶活性、土壤养分及产量的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 39(1): 57–64. [Xia W Y, Chen Y Y, Chai Z L, et al. 2021. Effects of drip irrigation under mulch on soil enzyme activities, soil nutrients and yield of potatoes in Ningnan mountainous area [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 39(1): 57–64.]
- 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高. 2020. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 [J]. *环境科学*, 41(4): 1914–1920. [Yang C D, Zong Y T, Lu S G. 2020. Dynamic effects of different biochars on soil properties and crop yield of acid farmland [J]. *Environmental Science*, 41(4): 1914–1920.]
- 杨 露, 毛云飞, 胡艳丽, 等. 2020. 生草改善果园土壤肥力和苹果树体营养的效果 [J]. *植物营养与肥料学报*, 26(2): 325–337. [Yang L, Mao Y F, Hu Y L, et al. 2020. Effects of orchard grass on soil fertility and apple tree nutrition [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 26(2): 325–337.]
- 袁 钧, 石跃进, 潘转霞, 等. 2002. 气象条件对旱地棉花产量的影响 [J]. *中国棉花*, 29(12): 10–11. [Yuan Z, Shi Y J, Pan Z X, et al. 2002. Effect of meteorological conditions on cotton yield in dryland [J]. *China Cotton*, 29(12): 10–11.]
- 张树兰, LarsLovdahl, 同延安. 2005. 渭北旱塬不同田间管理措施下冬小麦产量及水分利用效率 [J]. *农业工程学报*, 21(4): 20–24. [Zhang S L, LarsLovdahl, Tong Y A. 2005. Effects of different field management practices on winter wheat yield and water utilization efficiency in Weibei Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 21(4): 20–24.]
- 张勇强, 李智超, 厚凌宇, 等. 2020. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响 [J]. *土壤学报*, 57(1): 239–250. [Zhang Y Q, Li Z C, Hou L Y, et al. 2020. Effects of stand density on understory species diversity and soil nutrients in Chinese fir plantation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 57(1): 239–250.]
- 朱浩宇, 高 明, 龙 翼, 等. 2020. 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 [J]. *环境科学*, 41(4): 1921–1929. [Zhu H Y, Gao M, Long Y, et al. 2020. Effects of fertilizer reduction and application of organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus nutrients and crop yield in a purple soil sloping field [J]. *Environmental Science*, 41(4): 1921–1929.]
- Liu M, Han G L, Li X Q. 2021. Comparative analysis of soil nutrients under different land-use types in the Mun River Basin of northeast Thailand [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 21(2): 1136–1150.